基于基本体格检查提出综合肥胖指数的分析与应用

The Analysis and Application of an Integrated Obesity Index Based on Basic Physical Examination

崔珈铭 王英之杰

Jiaming CUI & Yingzhijie WANG

指导老师：黄文龙

Directed by: Mr. Wenlong HUANG

南京外国语学校

Nanjing Foreign Language School

江苏 南京

Jiangsu, Nanjing

2013 年 8 月

August. 2013

摘要

本文利用基本体格检查获取的物理体格指标即身高，体重，腰围和臀围，在现有通用肥胖标准即身高体重指数，腰围臀围比例和体脂肪率的基础上，提出了综合肥胖指数。综合肥胖指数在应用方式简便可行的基础上力求全面完善，在一定程度上弥补了现有各肥胖标准的局限性。基于该思路，本文通过建立几何模型提出了综合肥胖指数的应用公式并详细阐述了其推导过程。采用流行病学调查数据，本文将物理体格指标，性别，体脂肪率等变量带入模型进行数据分析，对所得图像作线性回归，依据体脂肪率拟合图线与其相交得到综合肥胖指数的标准界限。应用所得标准对于样本人群患病率分析比较，综合肥胖指数将在一定程度上弥补现有肥胖标准在应用中的缺陷。

关键词：体格指标，肥胖指数，几何模型，线性回归，拟合

Abstract

This paper proposes an Integrated Obesity Index (IOI) based on height, weight, waist, and hip, physical indicators that can be accessed through regular physical examinations, on top of the existing classifications of obesity, including Body Mass Index (BMI), Waist-Hip Ratio (WHR), and Body Fat Percentage (BFP). Integrated Obesity Index is aimed to be feasible and convenient under application, as well as comprehensive, compensating for the limitations of existing classifications of obesity. Thus, this paper proposes and examines the application formula of the IOI by establishing geometric models. Adopting the data from epidemiological survey, this papers brings physical indicators, gender, BFP and other variables into the model for data analysis, applies linear regression on the resulting images, and obtains the IOI cut-off point by intersecting the regression lines with fitting diagrams of BFP. By applying sample data into the resulting cut-off point for analysis and comparison, the paper demonstrates that the IOI will compensate for the deficiencies of the existing obesity classifications to a certain extent.

Keywords: Physical Indicators, Obesity Index, the Geometric Model, Linear Regression, the Fitting

目录

摘要--2

Abstract--2

目录--3

一、引言与相关生物医学概念--4

（一）相关生物医学概念---4

（二）引言--4

二、模型分析---5

（一）人体几何模型---5

（二）BMI 的数学意义--6

（三）IOI 的推导---7

三、数据分析---8

（一）数据预处理--9

（二）IOI 肥胖标准的界限划分及验证--9

（三）IOI 对样本人群的应用分析--15

四、总结---17

参考文献---18

附录--19

一、引言与相关生物医学概念

随着社会经济的不断发展与居民生活水平的不断提升，肥胖症作为一种慢性病成为人类目前面临最容易被忽视，而发病率在全球范围内急剧上升的一种疾病。超重与肥胖及其所带来的不良健康后果和进而带来的承重社会负担也日益显著。

（一）相关生物医学概念

医学临床上对于超重与肥胖的定义与诊断标准长久以来呈现多样化及动态化的趋势，目前较为常用的有身高体重指数（Body Mass Index，以下简称 BMI）,腰围臀围比例（Waist-Hip Ratio，以下简称 WHR）和体脂肪率（Body Fat Percentage，以下简称 BFP）。以上标准的计算应用方法及其对于肥胖的界限划分如下[1]：

$$BMI = \frac{w}{h^2}$$

其中 w = 体重，单位：kg，h = 身高，单位：m，BMI 单位：kg/m^2，世界通用标准为成年人$BMI >= 25$为超重，$BMI >= 30$为肥胖[2],东亚各国家地区采用不同标准，其中中华人民共和国卫生部疾病控制司颁布的标准为中国大陆人口$BMI >= 24$为超重，$BMI >= 28$为肥胖[3](表 1)。

BMI classification	
Underweight	<18.5
Normal range	18.5 – 24.9
Overweight:	>=25.0
Preobese	*25.0 – 29.9*
Obese:	>=30.0
Obese class I	*30.0 – 34.9*
Obese class II	*35.0 – 39.9*
Obese class III	*>=40.0*

表 1

BMI 肥胖指数分级

$$\mathrm{WHR} = \frac{Waist}{Hip}$$

其中 waist=腰围，以在末根肋骨与上肠骨中间的水平量度为标准，Hip=臀围，以在双腿并拢时以大粗隆的水平量为标准[4]，腰围与臀围应使用同一单位，男性和女性的标准比例分别是 0.9 和 0.85[5]；BFP 最为精确但较为昂贵的方法是测量患者在水下的体重，又称静水体重；也可由 BMI 指数推得，推导方法：

$$\mathrm{BFP\%} = 1.2 \times \mathrm{BMI} + 0.233 \times 年龄 - 10.8 \times 性别$$[6]

其中男性性别取值为 1，女性取值为 0，值得注意的是，具有相等 BMI 男性和女性，前者体脂含量比后者低 10%，如果体重仍维持相同水平，随着年龄的增长，体脂百分比也有所增长[7]，一般认为男性体脂>25%，女性>30%是诊断为肥胖的标准[8](表 2)。

BFP classification		
Description	**Women**	**Men**
Essential fat	10–13%	2–5%
Athletes	14–20%	6–13%
Fitness	21–24%	14–17%
Average	25–31%	18–24%
Obese	32%+	25%+

表 2

BFP 肥胖指数分级

（二）引言

临床统计表明，以上标准中以 BFP 最具有代表性，即该指数与预期代谢综合症的发病率相关性最大，但该指数由于其繁琐昂贵测量方法使其失去了广泛应用的可行性[9]。此外，由 BMI 指数推得的 BFP 值并不具有 BFP 值较 BMI 值所具有的优越性。因此，BMI 与 WHR 由于其测量计算的方法较为简便受到最为广泛的应用。但值得注意的是，BMI 与 WHR 各自具有较大的局限性：BMI 仅仅关注

了升高体重，而忽略了身体不同组成部分如肌肉的脂肪的不同密度导致的数值差异，例如肌肉非常发达的健美爱好者等相当大的一部分人群不适用于这一标准；WHR 单一地关注了人体的腰围与臀围，也具有类似的局限性。

临床应用中，患者与尚欠发达地区的一部分医护人员在显然不具备检测患者 BFP 硬件条件的同时往往不能够做到同时应用 BMI 与 WHR，在一定程度上忽视了部分潜在的肥胖人群，因此未能有效地针对其较高的代谢综合症潜在发病率做出有效地预防与治疗。

基于上文所提及的 BMI,WHR 与 BFP 在临床应用中的局限性，本文希望能对现有标准进行一定的分析讨论，采用数学的方法提出一个一方面考虑到数据采集的简便性及应用分析的可行性，另一方面又可以综合 BMI,WHR 与 BFP 的基本优势，将局限性最小化的**综合肥胖指数**（Integrated Obesity Index, 以下部分简称 IOI）模型。在实际应用中，综合肥胖指数仅需利用基本体格检查获取的物理体格指标即身高，体重，腰围和臀围，综合考虑人体的外部轮廓与组成成分，将 BMI,WHR 与 BFP 的基本优势最大化。

本文结构安排如下：第二部分利用人体几何模型构建综合肥胖指数模型，推导综合肥胖指数应用公式；第三部分采用 2007 年糖尿病和代谢综合症患病率变迁全国调查江苏分区数据[10]，将物理体格指标，性别，体脂肪率等变量带入模型进行数据分析，对所得图像作线性回归，依据体脂肪率拟合图线与其相交得到综合肥胖指数的标准界限，而后应用所得标准对于样本人群患病率分析比较，分别分析其对于群体与个体可能存在的潜在应用价值；第四部分总结全文。

二、模型分析

（一）人体几何模型

长久以来，人们在研究中将比理性论证应用到生物学，使用较为简易的几何模型进行研究以得到具有代表性的结果。因此，即便人是自然界最高级的生物体之一，结构造型复杂，在只考虑占人体大部分质量的躯干和四肢而忽略其它细节组成部分的前提假设下，人体的形状可以近似地看做两个台体加上一个椎体，如下图(图 1)：

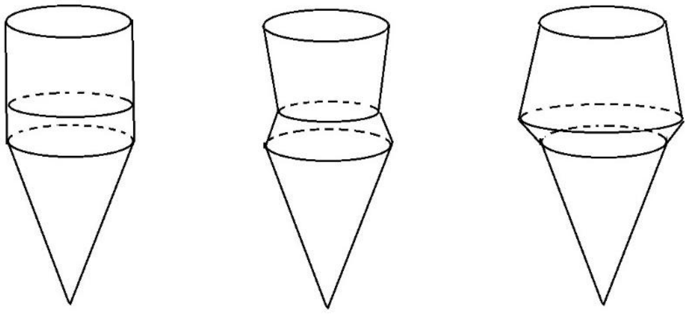

图 1
人体形状几何示意图

其中，身高为 H，上身长为 h，可以认为$h \propto H$，令$h/H = a$(a 为常数)；而肩宽的一周与臀围的一周面积相等，为 S；腰围与臀围比$WHR = K$；因而腰围一周的面积$S' = K^2S$；

人体体积可以近似这样算:$V_{人} = \frac{1}{3}h(S + \sqrt{SS'} + S') + \frac{1}{3}(H - h)S$

$$= \frac{1}{3}aH(S + \sqrt{S^2K^2} + K^2S) + \frac{1}{3}(1 - a)HS$$

$$= [\frac{a}{3}(K^2 + K) + \frac{1}{3}]SH$$

找出一个与人的体积相同的柱体 (图 2)：

其高度为 H，由于$V_{人} = V_{柱}$，所以$S_{底} = [\frac{a}{3}(K^2 + K) + \frac{1}{3}]S$

基础固体几何学认为$V \propto H^3$，故柱体底面积$S_{底} \propto H^2$

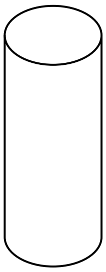

图 2
人体柱状几何示意图

又因为$BMI = M(KG)/H^2$（m^2），因此$BMI \propto M/S_{底}$

即 BMI 可以看作是单位底面积所承受的质量。

（二）BMI 的数学意义

依照以上推论及 BMI 的单位（kg/m^2)，BMI 可以认为是单位面积所承受的质量：BMI 值小则可以认为是单位面积所承受的质量小，反之，BMI 值大则可以认为是单位面积所承受的质量大。因此，在身高相同的情况下，BMI 值小的人身体密度较小，BMI 值大的人身体密度大。有参考文献可知，脂肪密度约为0.9g/mL略小于约为1.06g/mL的肌肉密度[11]，依此可推得 BMI 值小的人体脂率高，也可以认为其肥胖程度较高，而 BMI 值大的人体脂率低，肥胖程度较低。以上推论显然是不正确的，医学上普遍认定 BMI 值小的人肥胖程度较低，而 BMI 值大的人肥胖程度较高。

这就说明以上对于 BMI 的理解是有缺陷的：BMI 的概念是基于人的密度大致相同的基础上提出的，因此临床医学普遍认为人的单位面积所能承受质量的能力是一致的[12]。在国际标准中，BMI 以

$25kg/m^2$为是否超重界线，在此本文不妨认为$25kg/m^2$正比于人单位面积承受质量的值，也可以简单地认为$25kg/m^2$就是标准密度的人的单位面积承受质量。BMI 小于这个值，单位面积承受质量小，而本文认定单位面积承受质量是一样的，这说明这个人并没有这么大的截面积，进而说明这个人截面积较小，体型较瘦弱，肥胖程度较低；同理 BMI 值大的人单位面积承受不了标准截面积人该承受的质量，因此他的截面积要扩大，说明他比较肥胖程度较高。

以上体现出了 BMI 的局限性之一：没有考虑人的体脂率和密度存在普遍差异。换言之，对于一个个体，他的 BMI 可能表明他超重，但实际上他的承受能力大于一般认为的标准承受能力，因而他实际上不需要扩大自己的截面积来承重。本文需要改进的，是让这个承受质量公式适用于所有不同密度个体。

（三）IOI 的推导

事实上，本文不难找出两个个体，他们的身高同为 H，质量同为 M，（即 BMI 相同），臀围一周的截面积同为 S，但 WHR 分别为 K_1、K_2（$K_1<K_2$）(由于体脂率不同，密度不同）。本文令第二个人适用于 BMI，即其体脂率和密度等于标准值，因而 K_2 也为标准

根据体积公式：

$$V_1 = [\frac{a}{3}({K_1}^2 + K_1) + \frac{1}{3}]SH$$

$$V_2 = [\frac{a}{3}({K_2}^2 + K_2) + \frac{1}{3}]SH$$

将他们的体积转换成高为 H 的柱体(图 3)：

即得到两个高度相同，底面积不同的柱体，他们的底面积：

$$S_{底1} = \frac{V_1}{H} = [\frac{a}{3}({K_1}^2 + K_1) + \frac{1}{3}]S$$

$$S_{底2} = \frac{V_2}{H} = [\frac{a}{3}({K_2}^2 + K_2) + \frac{1}{3}]S$$

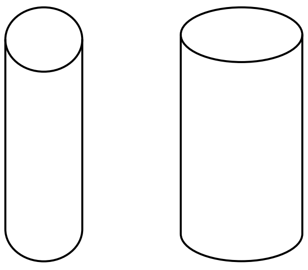

图 3
人体柱状几何示意图-2

他们的实际底面积承受质量(即他们不同的承受质量能力)：

$$\lambda_1 = \frac{M}{[\frac{a}{3}({K_1}^2 + K_1) + \frac{1}{3}]S}$$

$$\lambda_2 = \frac{M}{[\frac{a}{3}({K_2}^2 + K_2) + \frac{1}{3}]S}$$

令标准的$\frac{S_{底}}{H^2}$系数为 θ_2，则：

$$\lambda_2 \times H^2 \times \theta_2 = M$$

$$\lambda_1 \times H^2 \times \theta_1 = M$$

可得：

$$\frac{\theta_1}{\theta_2}=\frac{\lambda_2}{\lambda_1}=[\frac{a}{3({K_2}^2+K_2)}+\frac{1}{3}]/\,[\frac{a}{3({K_1}^2+K_1)}+\frac{1}{3}]$$

已知：$BMI\times {}^{1}/_{\theta_2}=\lambda_2$

故

$$\lambda1=\lambda2\times\frac{\frac{a}{3({K_1}^2+K_1)}+\frac{1}{3}}{\frac{a}{3({K_2}^2+K_2)}+\frac{1}{3}}$$

$$=\ BMI\times\frac{1}{\theta_2}\times\frac{\frac{a}{3({K_1}^2+K_1)}+\frac{1}{3}}{\frac{a}{3({K_2}^2+K_2)}+\frac{1}{3}}$$

$$=BMI\times\frac{\frac{a}{3({K_1}^2+K_1)}+\frac{1}{3}}{[\frac{a}{3(K_2^2+K_2)}+\frac{1}{3}]\theta_2}$$

由于前面已说明，$[{}^{a}/_{3(K_2^2+K_2)}+{}^{1}/_{3}]\theta_2$实际上是一个标准状况下的值，不妨将它看作是常数，因此可以得到一个新的承受质量公式：

$$\delta=\ BMI\times[\frac{a}{3}(K^2+K)+\frac{1}{3}]$$

其中 a 为常数，由于绝大部分人体纵向结构符合黄金分割率比例关系[13]，本文不考虑人体纵向结构的细微差别对人体体积产生的影响，遂统一取$a=\frac{5}{13}$，即新公式为：

$$\delta=\ BMI\times[\frac{5}{39}(K^2+K)+\frac{1}{3}]$$

其中$K=WHR$，$\delta=IOI$，即综合肥胖指数。

由以上推导可得，IOI 所反映的单位面积承受质量能够综合 BMI 与 WHR 的评估范围，弥补其局限性：IOI值大于标准值得人无论承受质量能力如何不同，都不得不扩大截面积，因而肥胖程度较高；反之，IOI值小于标准值得人无论承受质量能力如何不同，都不得不缩小截面积，因而肥胖程度较低。

下文将 IOI 应用于样本人群，划分 IOI 肥胖标准界限划分并对其进行验证分析，再分别阐述 IOI 对样本人群群体和个体的应用。

三、数据分析

本章应用 2007 年糖尿病和代谢综合症患病率变迁全国调查江苏分区数据，将物理体格指标，

性别，体脂肪率等变量带入模型进行数据分析，对所得图像作线性回归，依据体脂肪率拟合图线与其相交得到综合肥胖指数的标准界限，而后应用所得标准对于样本人群患病率分析比较，分析其对于群体与个体可能存在的应用价值。

（一）数据预处理

本文从 2007 年糖尿病和代谢综合症患病率变迁全国调查江苏分区数据库中共导出数据 3449 条，其中完整数据 2206 条。在完整数据中，再删选出未成年人受访者数据，得数据 2202 条。

对选区数据进行分析，有部分人体指标的情况出现异常，如下表(表 3)：

身高（CM）	体重（KG）	BMI	腰围（CM）	臀围（CM）	WHR	体脂率（%）
169	86	30.1	92	112	0.82	4.8
158	48	19.2	73	89	0.82	33.4

表 3 人体指标异常情况举例

第一个人的身高体重腰围臀围完全属于肥胖范畴，BMI=30.1, WHR=0.82,值得注意的是，该个体的体脂率实际偏低，这个误差很可能是测量错误或者数据录入的错误造成；第二个人身体指标正常，腰围臀围也正常，体脂率却偏高，这可能是人体的特例造成的。

考虑到上述数据异常的原因难以考证，为保证研究的科学严谨性，本文保留了此类数据进行分析。

（二）IOI 肥胖标准界限划分及验证分析

上一章中，通过推导分析已经得到的公式：$\delta = \mathrm{BMI} \times \left[{}^{5}\!/_{39}\,(\mathrm{K}^2 + \mathrm{K}) + {}^{1}\!/_{3}\right]$，其中 a 为常数，$\mathrm{K} = \mathrm{WHR}$，$\delta = \mathrm{IOI}$，即综合肥胖指数。然而，想要使得这个公式能够在实际应用中预测人们代谢异常的概率是否较高，还需要对 IOI 进行验证，并且给出“代谢异常高发人群”即通常认为的“肥胖或超重人群”的 IOI 范围，在所有统计人群中划定界限。

在本文中，考虑到 BMI 为目前时间范围内使用最为普遍与广泛的肥胖标准，将重点比较 IOI 与 BMI。

根据前文所述，临床统计表明， BFP 最具有代表性，即该指数与预期代谢综合症的发病率相关性最大，但该指数由于其繁琐昂贵测量方法使其失去了广泛应用的可行性。为了验证 IOI 是否能反映人群的不同肥胖程度，本文做出了 IOI(δ)与体脂率的图像(图 4)：

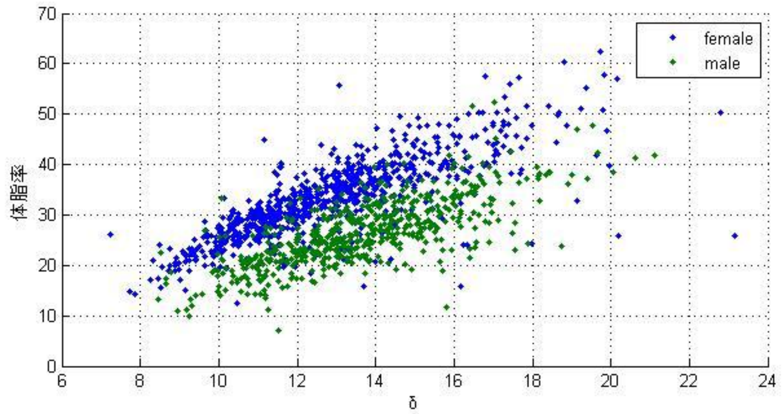

图 4　　IOI(δ)与体脂率的图像

由上图，可以很明显的看出，IOI 与体脂率成线性关系。同时，男性、女性之间有较为清晰的界线，恰好符合前文所述：肥胖程度相同的男性和女性，后者的体脂率比前者高约 10%。

为了对比 IOI 的优越性，本文同样做出了 WHR 与 BFP 的关系图像及 BMI 和 BFP 关系的图像。

作 BFP 与 WHR 的关系图像如下(图 5)：

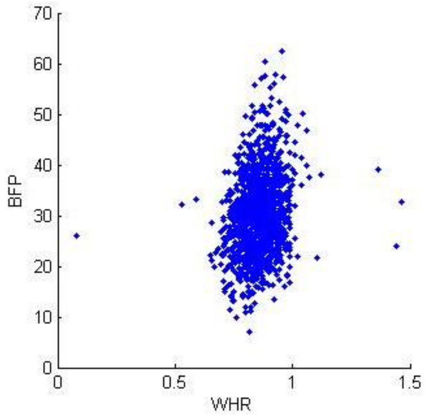

图 5　　BFP 与 WHR 的关系图像

在 BFP 与 WHR 的关系图像中，可以看出一个线性关系，说明 WHR 对 BFP 有一定影响力，因此将其纳入考虑范围得出的 IOI 是与 BMI 相比更合理、更全面的。

作 BFP 与 BMI 的关系图像如下(图 6)：

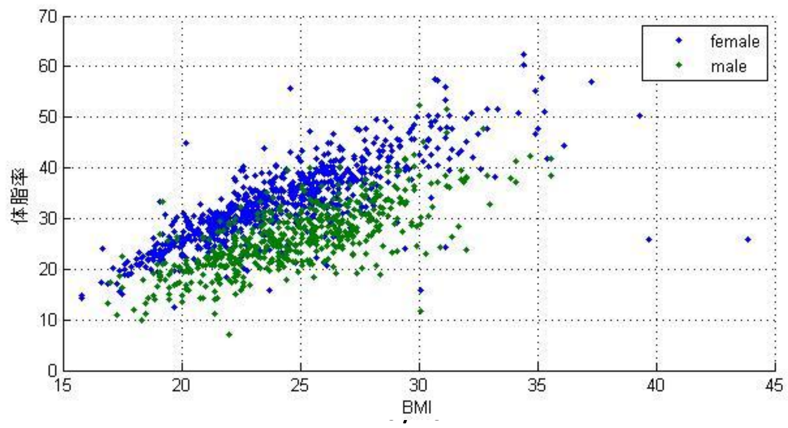

图 6 BFP 与 BMI 的关系图像

在 BFP 与 BMI 的关系图像中，男性、女性的点的聚合程度较 BFP 与 IOI 的关系图有所欠缺。在引言部分的背景知识介绍中本文曾经提到过 BMI 与体脂率的换算公式：$\mathrm{BFP\%} = 1.2 \times \mathrm{BMI} + 0.233 \times 年龄 - 10.8 \times 性别$，其中男性取值为 1，女性取值为 0.这个公式虽然考虑了男女体脂比的差，但普遍认为由 BMI 指数推得的 BFP 值较 BMI 值并不具有优越性。在此可得如下分析，BMI 指数相同的男性女性中，有一部分体脂率也是相同的。换言之，男性女性统一的 BMI 标准无法准确对应男性女性不同的体脂率标准。因此，合理推导下，新的公式的优越性在于，男性女性相同的 IOI 值可以较为准确的对应其不同的体脂率。

历史研究表明 BFP 与年龄有一定的相关性[7]，本文做出了年龄和 BFP 的图像(图 7)：

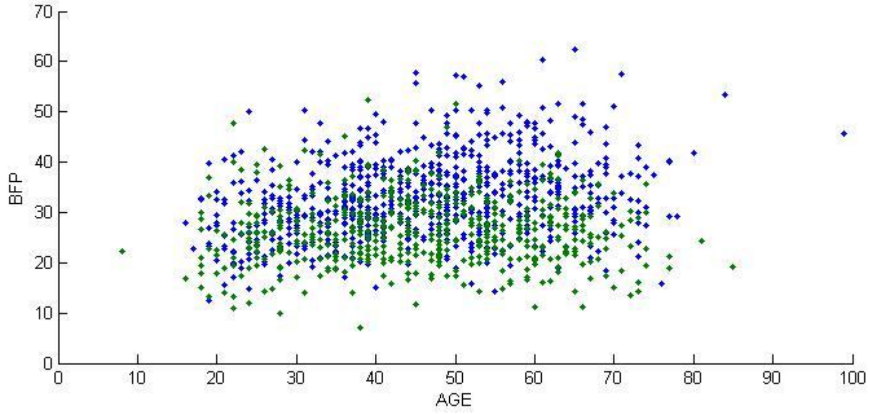

图 7 年龄和 BFP 的图像

由此可见，年龄与体脂率之间并没有非常明显的线性关系，即使体脂含量在一定程度上随年龄变化，其变化较为细微；另外，本文没有找到叙述体脂率与年龄之间的明确的关系的文献，也没有能够证明 BMI 换算公式科学性的资料，因此本文不考虑年龄与体脂率的关系。为避免变量不统一，本文在分析 BMI 时也不考虑年龄的因素。

基于以上猜想以及体脂率标准在当下是最被认可的肥胖标准，本文试图通过线性回归找到 IOI 与体脂率的关系，同时验证猜想。

建立 IOI 与 BFP 的方程：

$$\mu = \theta_1 + \theta_2\delta$$

（BFP=μ，IOI=δ，θ_1、θ_2 为常数）

用 Matlab 对女性 IOI 与体脂率标准做线性回归后得到：

B =

0.0001

2.5770

STATS =

1.0e+003 *

0.0006　　1.1877　　0.0000　　0.0235

即体脂率（μ）= 7.40696751989167e-05+2.57702105517688*δ （δ =IOI）

由 STATS 返回值：R^2=1.0；F=1.1877>f=0.0000；p=0.0235<alpha=0.05;

因此，拟合的准确性较高。

同理，对男性 IOI 与体脂率做线性回归得：

B =

-4.1240

2.2444

STATS =

0.5446　646.9094　　0.0000　　20.1748

由 STATS 返回值：R^2=0.5446；F=646.9094>f=0.0000；p=20.1748>alpha=0.05；

这里，p 值大于默认的 alpha 值，准确性并不够高，但从图像看拟合程度尚可，因此先暂时认为其正确，下文将具体分析。

体脂率（μ）= -4.12403059011801+2.24440311074324*δ （δ =IOI）

使用 Matlab 作图，得(图 8)：

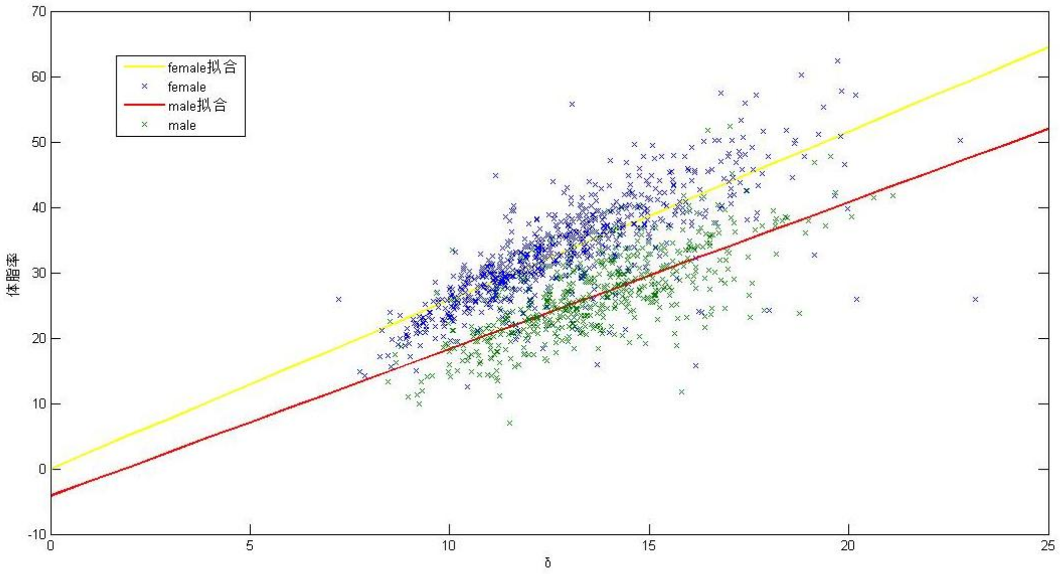

图 8 BFP 与 IOI 线性回归关系图

做出男性 μ=25%，女性 μ=30% 图线，与拟合图线相交(图 9)：

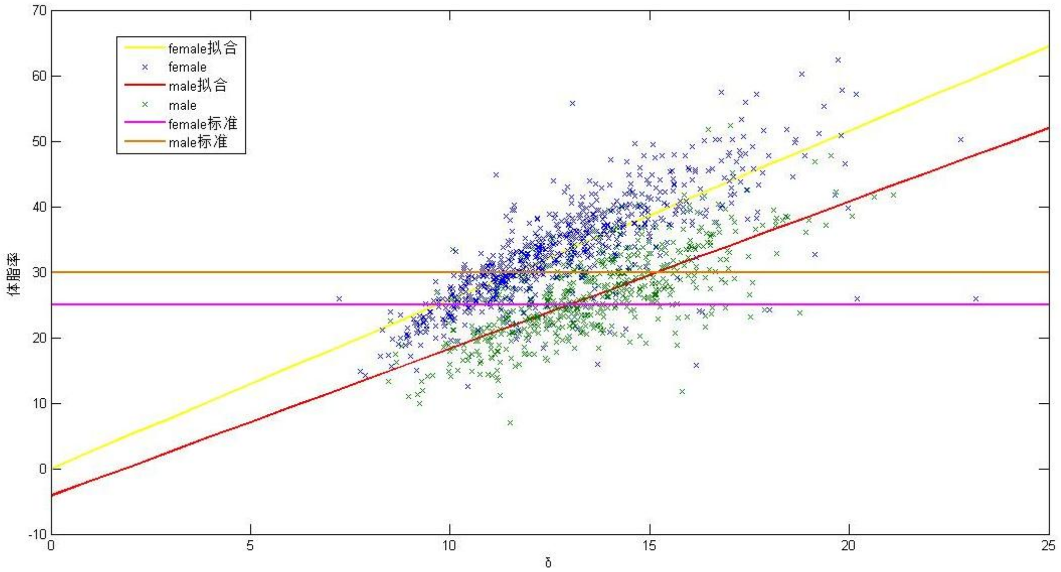

图 9　IOI 与 BFP 关系拟合突显与 BFP 标准直线交点示意图

解线性代数方程组：

$$\begin{cases} \mu = 30 \\ \mu = 7.40696751989167e\text{-}05 + 2.57702105517688 * \delta \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mu = 25 \\ \mu = -4.12403059011801 + 2.24440311074324 * \delta \end{cases}$$

得出交点：

女性（11.641319681909112092203653436247, 30.0）

男性：（12.976292204689393049677560999142, 25.0）

因此，本文认为，**女性的 IOI>= 11.64 时可视其为肥胖，男性的 IOI>= 12.976 时可视其为肥胖**。

同理，对 BMI 与体脂率做线性回归，得(图 10)：

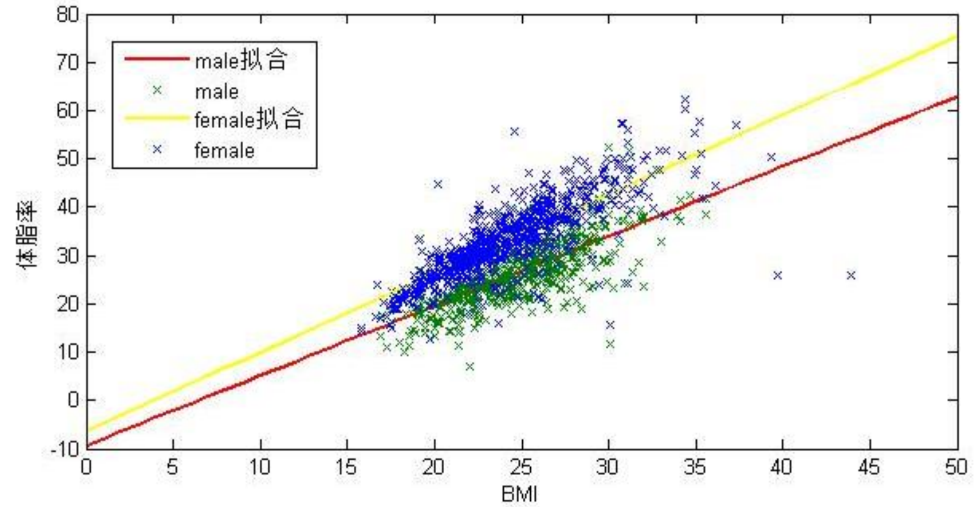

图 10　BFP 与 BMI 线性回归关系图

女性：

B =

-6.3716

1.6354

STATS =

1.0e+003 *

0.0006 1.2859 0.0000 0.0224

男性：

B =

-9.3185

1.4437

STATS =

0.5349 622.2517 0.0000 20.6025

做出男性 μ=25%，女性 μ=30% 图线，与拟合图线相交(图 11)：

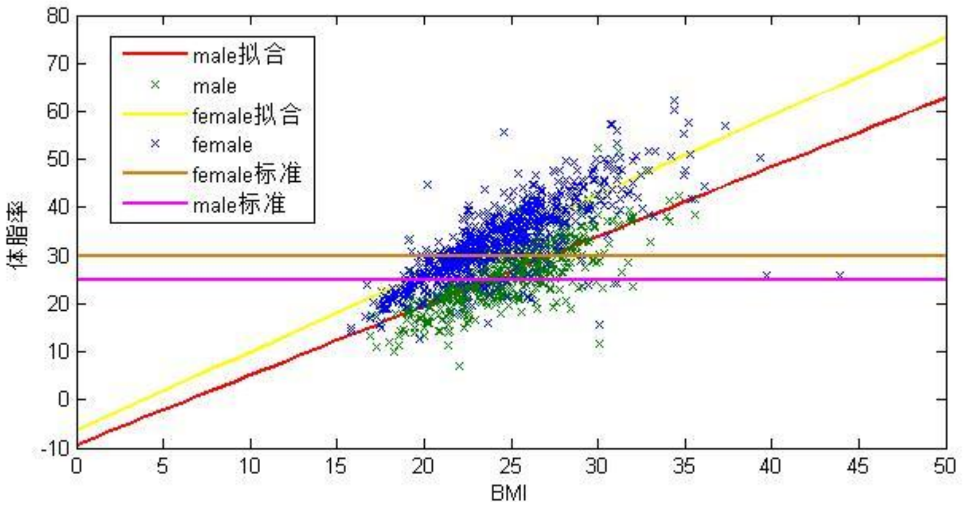

图 11　BMI 与 BFP 关系拟合突显与 BFP 标准直线交点示意图

女性 μ=-6.37157579867540+1.63537111354473*BMI

交点 (22.24056392914914940831205928413, 30.0)

男性 μ=-9.31845436900497+1.44367588279567*BMI

交点（23.771578356318719916959784830479, 25.0）

对比上述两个结果得：

BMI 与体脂率线性回归得到的 STATS 返回值与其在 IOI 于体脂率回归中的情况大致相同。其中男性的

p 均约为 20，远大于默认的 alpha=0.05。

数据预处理中，本文曾提及两例数据异常情况。这两项数据全部选自男性，而本文考虑到男性不同于女性的生活习惯，认为其体形的极端情况（如肌肉含量大幅度高于普遍认知）出现概率较大。但为了研究普遍现象，在这里本文也认为$p \approx 20$是属于可接受范围内，两次不同的拟合都出现$p \approx 20$也体现出一个相互验证的过程。

男女性不同的体脂肥胖标准所对应的 IOI 值之差并没有向本文预想的那样远小于 BMI 之差，而仅仅小了 0.1，这只说明 IOI 是运用男女统一标准时相对误差更小的并且侧面也反映出 IOI 是合理的，在这方面没有非常显著优越性。

（三）IOI 对样本人群的应用分析

本文将得到的肥胖标准界线（女性 IOI=11.641，男性 IOI=12.976）运用到统计的人群中，得下表(表 4)：

类别	正常		肥胖	
	人数	百分比	人数	百分比
患病	42	4.90%	118	8.79%
糖耐量低	3	0.35%	17	1.27%
正常	813	94.76%	1207	89.95%
总计	858	100.00%	1073	100.00%

表 4

由上表可见，肥胖、超重人群糖尿病（包括前期的糖耐量低）的发病率几乎等于体型正常的人的两倍，这与将 BMI、体脂率带入的标准几乎相同，因此，IOI 是准确的。

然而，按照 IOI 的新标准划分分胖群体，有 483 人按原先标准并不肥胖，按现在的标准属于肥胖，其中有 42 人患病，患病率：$42 \div 483 \times 100\% = 8.7\%$，是符合肥胖人群的糖尿病发病率的，可以说他们的发病率高于正常人，可见 IOI 对与个体来说更为精准，更有意义。

本文在选取数据中选取了两种情况作具体分析(表 5,6)：

姓名	身高（cm）	体重（kg）	BMI	腰围（cm）	臀围（cm）	WHR	BFP（%）	IOI（δ）
王*昌	166	67	24.3	77	99	0.778	26.8	12.4
高*刚	175	75	24.5	81	104	0.779	23.4	12.5
李*	165	66	24.3	75	94	0.799	22.3	12.6
朱*苟	162	63	24.1	74	91	0.813	25.6	12.6
朱*根	164	65	24.2	80	99	0.808	20.5	12.6
金*铭	170	70	24.2	80	98	0.816	22	12.7

朱*林	158	61	24.4	78	97	0.804	17.8	12.7
王*保	161	63	24.1	80	96	0.833	22.3	12.8
洪*忠	173	72	24.1	85	102	0.833	23.2	12.8
蒋*闪	164	67	24.8	78	98	0.796	21.6	12.8
殷*	170	70	24.2	72	86	0.837	15.3	12.8
胡*梅	166	67	24.4	89	107	0.832	24.3	12.9
周*波	174	74	24.6	83	101	0.822	25.0	12.9
刘*华	161	62	24.1	82	96	0.854	24.2	12.9
张*宝	170	70	24.2	78	92	0.848	27.0	12.9
周*	174	73	24.1	83	97	0.856	19.9	12.9
蒋*文	174	75	24.8	83	102	0.814	27.1	13.0
丁*辉	172	74	24.9	84	104	0.808	19.5	13.0

表 5

以上一组例子全部取自按 IOI 标准划分属于正常范畴,但按照 BMI 的亚洲标准属于超重的群体。这群人仅最后一人患糖尿病，发病率约为 5.5%。仔细观察不难发现，这群人的共同特点是 WHR 较小同时体脂率偏低，他们就是 IOI 的受益群体之一，即因为锻炼身体或先天因素，身体中肌肉含量较高的近肥胖群体。因此，对于这样的个体，即使他们在亚洲人中按 BMI 算属于超重，他们患糖尿病的概率并无异于正常人。

同样的，在新划定的肥胖人群中，我们也选取了一些例子：

姓名	身高（cm）	体重（kg）	BMI	腰围（cm）	臀围（cm）	WHR	BFP（%）	IOI（δ）
程*英	148	50	22.7	76	94	0.809	30.6	11.8
顾*爱	152	52	22.4	84	90	0.934	34.4	12.6
胡*文	164	63	23.3	89	96	0.927	28.4	13.1
曹*翔	156	55	22.8	82	93	0.881	31	12.4
张*英	163	62	23.1	80	95	0.842	29.7	12.3
汪*	162	60	23	79	89	0.888	31.3	12.6
赵*	149	52	23.2	82	95	0.863	33.4	12.5
程*芹	159	59	23.3	73	89	0.820	33.2	12.2
余*玲	159	59	23.3	75	90	0.833	33.6	12.3
余*玲	163	62	23.3	76	91	0.835	30.7	12.3
胡*文	164	63	23.3	89	96	0.927	28.4	13.1

表 6

以上人群均为患病群体，然而根据 BMI 他们是不会被认为肥胖或者被提醒患有代谢综合症概率高于常人的，按 IOI 标准他们则属于肥胖，患病概率较高。分析他们的物理体格指标可见，他们的体脂率和腰围臀围比较大，属于肥胖超重人群，使得他们使用 IOI 公式计算式得到的 δ 值甚至大于上一张表中 BMI 比他们大的人的 δ 值。因此，IOI 对于不是非常重但体脂率很高的近似不肥胖超重的人群也有很大意义。

在本文纳入分析的 2202 条数据中，至少有 29 条可以充分表明 IOI 在个体应用上的优势；换言之，将有至少 1.3%的人群直接获益于 IOI 的应用与推广。以上分析表明，对于个体而言，IOI 数值在具有科学性准确性的同时，也具有较单独使用 BMI 或 WHR 的优势性。这一优势对于特殊体型人群时 IOI 的推广与应用将在一定程度上减小由普遍存在的特殊体型所造成的肥胖标准应用偏差。

四、总结

本文利用基本体格检查获取的物理体格指标即身高，体重，腰围和臀围，在现有通用肥胖标准即身高体重指数,腰围臀围比例和体脂肪率的基础上，提出了综合肥胖指数。综合肥胖指数在应用方式简便可行的基础上力求全面完善，在一定程度上弥补了现有各肥胖标准的局限性。基于该思路，本文通过建立几何模型提出了综合肥胖指数的应用公式$\delta = \mathrm{BMI} \times [\frac{5}{39}(\mathrm{K}^2 + \mathrm{K}) + \frac{1}{3}]$（其中 a 为常数，$\mathrm{K} = \mathrm{WHR}$，$\delta = \mathrm{IOI}$，即综合肥胖指数）并详细阐述了其推导过程。采用江苏省 2007 年流行病学调查数据，本文将物理体格指标，性别，体脂肪率等变量带入模型进行数据分析，对所得图像作线性回归，依据体脂肪率标准直线与其相交得到综合肥胖指数的标准界限为：男性>=13.0,女性>=11.6 即可以认为其肥胖。

应用所得标准对于样本人群患病率分析比较，本文指出，在对于群体的统计应用方面，IOI 数的误差与 BMI 相近，说明其具有群体应用的可行性与推广价值，但并没有展现出其较 BMI 明显的优势性；在对于个体肥胖程度初级评估方面，IOI 展示了其独特的优越性：IOI 测算的测量方法简单，不需要进行抽血化验或应用价格昂贵的体脂检测仪，IOI 指数数值大小就可以体现出较 BMI 和 WHR 与体脂含量更强烈的相关性。综合肥胖指数的应用与推广将在一定程度上弥补现有肥胖标准在应用中的缺陷。

在本文的基础上，我们还可以进一步考虑将其他可能相关的变量，如年龄，家族遗传，内脏脂肪含量，生活习惯等纳入模型进行分析。此外，可以进一步考虑根据不同的肥胖类型，如全身性肥胖，腹型肥胖等的体格检查指标差异建立更为精确的分析模型，减小应特殊肥胖类型所造成的肥胖标准应用偏差。

参考文献

[1]Quetelet LAJ. “AntropométrieouMesure des DifférencesFacultés de l'Homme”. Brussels: Musquardt.

[2]WHO: Global Database on Body Mass Index. “WHO: Global Database on Body Mass Index.” N.p., n.d. Web. 26 Aug. 2013.

[3]Bei-Fan Z; Cooperative Meta-Analysis Group of Working Group on Obesity in China (December 2002). "Predictive values of body mass index and waist circumference for risk factors of certain related diseases in Chinese adults: study on optimal cut-off points of body mass index and waist circumference in Chinese adults". Asia Pac J ClinNutr. 11 Suppl 8: S685–93. doi:10.1046/j.1440-6047.11.s8.9.x. PMID 12534691.

[4] World Health Organization. “STEP wise approach to surveillance (STEPS)". Retrieved March 21, 2012.

[5]Yusuf S, Hawken S, Ounpuu S, Dans T, Avezum A, Lanas F, McQueen M, Budaj A, Pais P, Varigos J, Lisheng L, INTERHEART Study Investigators. (2004). "Effect of potentially modifiable risk factors associated with myocardial infarction in 52 countries (the INTERHEART study): Case-control study". Lancet 364 (9438): 937–52. doi:10.1016/S0140-6736(04)17018-9. PMID 15364185.

[6]BMI to body fat percentage formula, Deurenberg, Paul; Weststrate, Jan A.; Seidell, Jaap C. (2007). "Body mass index as a measure of body fatness: Age- and sex-specific prediction formulas". British Journal of Nutrition 65 (2): 105–14. doi:10.1079/BJN19910073. PMID 2043597.

[7] Jackson, AS; Stanforth, PR; Gagnon, J; Rankinen, T; Leon, AS; Rao, DC; Skinner, JS; Bouchard, C et al. (2002). "True". International Journal of Obesity 26 (6): 789–96. doi:10.1038/sj.ijo.0802006. PMID 12037649.

[8]Okorodudu et al, 2010. “International Journal of Obesity” (2010) 34, 791–799

[9]Fields, D. A. "Body-composition assessment via air-displacement plethysmography in adults and children: a review "Am J ClinNutr March 2002 vol. 75 no. 3 453-467

[10]Zhu, Dalong, Pro. Dr., and Guoyu Tong, comps. "糖尿病和代谢综合症患病率变迁全国调查.” (2007): n. pag. Print.

[11] Mendez J, Keys A, 1960. “Density and composition of mammalian muscle”. Metabolism 9:184-188

[12]Pavlidis, Theo. “The (Lack Of) Science behind the Body Mass Index (BMI)”. N.p., n.d. Web.

[13] Livio, Mario (2002). The Golden Ratio: The Story of Phi, The World's Most Astonishing Number. New York: Broadway Books. ISBN 0-7679-0815-5

附录

一、Matlab 计算代码

```
%体脂率和δ 的线性回归：

F=xlsread('work\female')；
M=xlsread('work\male')；

%求女性 IOI 与 BFP 的回归直线：
x1=F(:,231)；% IOI
y1=F(:,201)；%BFP
[B,BINI,R,RINI,STATS]=regress(y1,[ones(length(x1),1),x1])；

%做回归直线图像及数据散点图：
x=0:25；
y=B(1)+B(2)*x；
figure
plot(x,y)；
hold on；
scatter(x1,y1)；
%界线直线作图：
plot([0,25],[30,30]);
%求界线直线与回归直线交点：
aa=solve('y=30','y=B(1)+B(2)*x');
[aa.x,aa.y];

%求男性 IOI 与 BFP 的回归直线：
x2=M(:,231);
y2=M(:,201);
[B,BINI,R,RINI,STATS]=regress(y2,[ones(length(x2),1),x2]);
%作回归直线图像及数据散点图：
x=0:25;
y=B(1)+B(2)*x;
plot(x,y);
hold on;
scatter(x2,y2);
%界线直线作图：
plot([0,25],[25,25]);
%求界线直线与回归直线交点：
aa=solve('y=25','y=-B(1)+B(2) *x');
[aa.x,aa.y];
```

```
%体脂率和 BMI 的线性回归：
F=xlsread('work\female');
M=xlsread('work\male');


x1=F(:,187); %BMI
y1=F(:,201);%BFP
[B,BINI,R,RINI,STATS]=regress(y1,[ones(length(x1),1),x1]);

x=0:50;
y= B(1)+B(2)*x;
plot(x,y);
hold on;
scatter(x1,y1);
plot([0,25],[30,30]);
aa=solve('y=30','y=B(1)+B(2)*x');
[aa.x,aa.y];


x2=M(:,187);
y2=M(:,201);
[B,BINI,R,RINI,STATS]=regress(y2,[ones(length(x2),1),x2]);
x=0:50;
y=B(1)+B(2)*x;
plot(x,y);
hold on;
scatter(x2,y2);
plot([0,25],[25,25]);
aa=solve('y=25','y=B(1)+B(2) *x');
[aa.x,aa.y];
```